

El efecto de los nitratos en el rendimiento de atletas de élite

Trabajo de fin de grado

Trabajo de profundización

Convocatoria Junio 2021

Grado de Nutrición Humana y Dietética

Departamento de Nutrición, Ciencias de la Alimentación y Gastronomía

Facultad de Farmacia y Ciencias de la Alimentación

Universidad de Barcelona

Maria-Madalina Lazar



Esta obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Abstract

Background: The use of nitrate-rich products in order to improve physical performance has dramatically increased in popularity. Since a high intake of nitrates could increase the availability of nitric oxide and achieve ergogenic effects during sports practice, this review aims to evaluate the possibility of achieving ergogenic doses exclusively from the diet, in addition to establishing the sports modalities in which nitrate could be a viable ergogenic aid.

Methods: A systematic review of the literature has been carried out using the PubMed, Scopus and Mendeley databases. Twelve studies have met the eligibility criteria: randomized single- or double-blind trials in well-trained subjects or elite athletes using a nitrate-rich beet juice supplement. The PRISMA strategy has been used for the study selection process.

Conclusion: The benefits of dietary nitrate supplementation are statistically significant in few cases in well-trained subjects and in elite athletes. These beneficial effects have been observed in strength modalities and in high-intensity aerobic exercises. The doses that seem to have positive effects are very variable (6.5-12.8mmol), so ingesting high doses of nitrate (12.8mmol) chronically only from fruits and vegetables is an unlikely nutritional strategy.

Keywords: Dietary nitrate, Beetroot juice, Exercise performance, Nitric oxide, Elite athletes

Resumen

Introducción: El uso de productos ricos en nitrato con el fin de mejorar el rendimiento físico ha aumentado drásticamente en popularidad. Puesto que una ingesta alta en nitratos podría aumentar la disponibilidad de óxido nítrico y conseguir efectos ergogénicos durante la práctica deportiva, esta revisión pretende evaluar la posibilidad de alcanzar las dosis ergogénicas exclusivamente a partir de la dieta, además de establecer las modalidades deportivas en las que el nitrato podría ser una ayuda ergogénica viable.

Métodos: Se ha llevado a cabo una revisión sistemática de la literatura utilizando las bases de datos PubMed, Scopus y Mendeley. Doce estudios han reunido los criterios de elegibilidad: ensayos de simple o doble ciego aleatorizados en sujetos bien entrenados o atletas de élite utilizando un suplemento de zumo de remolacha rico en nitrato. Se ha utilizado la estrategia PRISMA para el proceso de selección de estudios.

Conclusión: Los beneficios de la suplementación con nitrato dietético son estadísticamente significantes en pocos casos en sujetos bien entrenados y en atletas de élite. Estos efectos beneficiosos han sido observados en modalidades de fuerza y en ejercicios aeróbicos de alta intensidad. Las dosis que parecen tener efectos positivos son muy variables (6.5-12.8mmol), por lo que ingerir dosis elevadas de nitrato (12.8mmol) de forma crónica exclusivamente a partir de frutas y verduras es una estrategia nutricional poco práctica.

Palabras clave: Nitrato dietético, Zumo de remolacha, Rendimiento deportivo, Óxido nítrico, Atletas de élite

El efecto de los nitratos en el rendimiento de atletas de élite

Maria Lazar¹

¹Facultad de Farmacia y Ciencias de la Alimentación, Campus de la Alimentación de Torribera, Universidad de Barcelona, E-08921, Santa Coloma de Gramanet, España

*Correspondencia: mariamadalinalazar@gmail.com

Resumen

Introducción: El uso de productos ricos en nitrato con el fin de mejorar el rendimiento físico ha aumentado drásticamente en popularidad. Puesto que una ingesta alta en nitratos podría aumentar la disponibilidad de óxido nítrico y conseguir efectos ergogénicos durante la práctica deportiva, esta revisión pretende evaluar la posibilidad de alcanzar las dosis ergogénicas exclusivamente a partir de la dieta, además de establecer las modalidades deportivas en las que el nitrato podría ser una ayuda ergogénica viable.

Métodos: Se ha llevado a cabo una revisión sistemática de la literatura utilizando las bases de datos PubMed, Scopus y Mendeley. Doce estudios han reunido los criterios de elegibilidad: ensayos de simple o doble ciego aleatorizados en sujetos bien entrenados o atletas de élite utilizando un suplemento de zumo de remolacha rico en nitrato. Se ha utilizado la estrategia PRISMA para el proceso de selección de los estudios.

Conclusión: Los beneficios de la suplementación con nitrato dietético son estadísticamente significantes en pocos casos en sujetos bien entrenados y en atletas de élite. Estos efectos beneficiosos han sido observados en modalidades de fuerza y en ejercicios aeróbicos de alta intensidad. Las dosis que parecen tener efectos positivos son muy variables (6.5-12.8mmol), por lo que ingerir dosis elevadas de nitrato (12.8mmol) de forma crónica exclusivamente a partir de frutas y verduras es una estrategia nutricional poco práctica.

Palabras clave: Nitrato dietético, Zumo de remolacha, Rendimiento deportivo, Óxido nítrico, Atletas de élite

INTRODUCCIÓN

La nutrición deportiva es una rama de la nutrición centrada en aquellas estrategias con el potencial de maximizar el rendimiento competitivo de un atleta, como un programa de entrenamiento adaptado, un correcto descanso, una hidratación y alimentación planificadas, una selección de

suplementos nutricionales basada en la evidencia científica, etc. [1]. No ha sido hasta la última década que se ha demostrado que la disponibilidad de nutrientes juega un papel importante en la señalización celular de rutas capaces de modular adaptaciones fisiológicas al entrenamiento de fuerza y resistencia [1,2].

En el presente trabajo se pretende llevar a cabo una búsqueda bibliográfica para determinar el grado en el que la suplementación con nitrato dietético (NO_3^-) puede ayudar a mejorar el rendimiento deportivo. El uso de productos ricos en nitrato en la práctica deportiva es un tópico que en la última década ha aumentado drásticamente su popularidad [2–5]. La investigación sobre su papel como ayuda ergogénica emplea productos como el zumo de remolacha para mejorar el rendimiento físico en diferentes escenarios de entrenamiento e individuos [1–4,6–8].

Las investigaciones iniciales muestran resultados ambiguos. Por un lado, la suplementación con nitrato inorgánico mejora la tolerancia al ejercicio y/o el rendimiento físico en sujetos sanos y activos durante la práctica de ejercicio de resistencia de alta intensidad [8–12]. En contraste, otros estudios no han observado efectos ergogénicos en el rendimiento tras la suplementación con zumo de remolacha (BJ) en sujetos moderadamente entrenados [13]. Además, los beneficios observados en atletas de élite no son notorios [4,6,14,15].

Debido a la gran variabilidad entre los diferentes estudios hay una falta de consenso respecto la efectividad y modo de uso. Esta variabilidad en los efectos ergogénicos de la suplementación con nitrato dietético se explica a través de factores como el nivel de entrenamiento de los sujetos, la dosis y el tiempo de suplementación, factores ambientales, el sexo, tipo de ejercicio, dieta base y, algunos factores interindividuales como el nivel de sensibilidad de los sujetos [4,14,16–18].

En consecuencia, el objetivo de este trabajo es determinar 1) qué pauta de suplementación con

NO_3^- tiene efectos notorios sobre el rendimiento físico en atletas bien entrenados y de élite, con el fin de confeccionar un conjunto de preparaciones culinarias que permitan ingerir la dosis necesaria para obtener una mejora de rendimiento estadísticamente significativa, y 2) el tipo de ejercicio en el que el nitrato tiene efectos ergogénicos significativos.

METODOLOGÍA

Estrategia de búsqueda

Se han identificado los estudios que evalúan los efectos de la suplementación con NO_3^- en diferentes tipos de ejercicios a través de una búsqueda en las siguientes bases de datos: PubMed, Scopus y Mendeley. La búsqueda se ha acotado para estudios publicados entre los años 2015 y 2021. Se han utilizado diferentes términos de búsqueda y expresiones booleanas: “dietary nitrate” OR “nitrate supplementation” OR “beetroot juice” (concepto 1) AND “exercise performance” OR “sports performance” (concepto 2) AND “athletes” OR “trained athletes” (concepto 3).

Criterios de elegibilidad

Se ha aplicado la estrategia PICOS para enmarcar la pregunta de investigación y para definir los criterios de inclusión: P (población): “atletas sanos con un nivel de rendimiento correspondiente a PL4 o PL5, según las directrices de clasificación de sujetos en la investigación de ciencias del deporte [19], con una edad entre 18 y 65 años”; I (intervención): “suplementación con BJ rico en NO_3^- ”; C (comparación): “mismas condiciones con un grupo control o placebo (PLA) en forma de BJ sin

NO₃-; O (resultados): “medidas de rendimiento”; S (diseño del estudio): “diseño de doble ciego o ciego simple y aleatorizado”.

Selección de estudios y extracción de datos

Se han aplicado los siguientes criterios de inclusión para seleccionar los estudios: a) artículos cuyo diseño experimental incluye la ingesta de una o más dosis de BJ antes del ejercicio en atletas sanos; b) estudios con situaciones experimentales idénticas con ingesta de un PLA; c) estudios con un diseño de doble o simple ciego y aleatorizado paralelo o cruzado; d) información clara acerca de la administración del BJ; e) los estudios que han administrado NO₃ en forma de gel o pastillas o en combinación con otras sustancias se han excluido; f) estudios escritos en inglés.

Se han aplicado los siguientes criterios de exclusión: a) estudios realizados en sujetos sedentarios, activos de forma recreacional o entrenados (correspondientes a los niveles de rendimiento PL1, PL2 y PL3, respectivamente); b) estudios realizados en adultos jóvenes (<18 años), adultos mayores (>65 años) y/o sujetos enfermos; c) estudios sin disponibilidad de texto completo; d) estudios sin un diseño experimental.

No se ha aplicado ninguna restricción en cuanto al tamaño de la muestra de participantes o el tipo de ejercicio utilizado para la investigación.

Se han extraídos los siguientes datos: primer autor, año de publicación, diseño del estudio, población de estudio (tamaño de la muestra, género y nivel de actividad), tipo de ejercicio, protocolo de suplementación, dosis de NO₃-, y resultados principales (medidas de rendimiento).

VISIÓN GENERAL DEL TEMA

¿Qué son los nitratos?

Los nitratos son sales formadas por moléculas de nitrógeno y oxígeno (O₂) que tienen en común la presencia del anión nitrato [20]. Los nitratos están presentes de forma natural en alimentos de origen vegetal, principalmente en verduras y hortalizas, en menor medida en el agua, y de modo adicionado en algunos alimentos cárnicos o quesos procesados, en forma de sales de nitrito desempeñando un papel de aditivo o conservante [20,21].

La fuente mayoritaria de NO₃- se encuentra en vegetales de hoja verde y en hortalizas de raíz [21,22]. En la Tabla 1 se recoge una lista de frutas y verduras clasificadas por grupos en función de su contenido en nitrato: alto con un contenido superior a 1000mg p/kg de alimento, medio con un contenido entre 500 y 1000 mg/kg, bajo con un contenido entre 200 y 500 mg/kg y muy bajo con niveles inferiores a 200 mg/kg de alimento

Tabla 1. Concentraciones de nitratos en distintas frutas, verduras y hortalizas (mg/kg).

Categoría	Alimento	Nivel medio (mg/kg)	Alimento	Nivel medio (mg/kg)
Alto	Rúcula	2597	Acelgas	1690
	Espinaca	2137	Endibias	1465
	Canónigos	2104	Remolacha	1459
	Lechuga	1893	Col china	1388
	Rábano	1868	Apio	1103
Medio	Calabaza	894	Escarola	523
	Lechuga iceberg	875	Repollo	513
	Nabo	624		
Bajo	Judías verdes	496	Pepino	240
	Calabacín	419	Zanahoria	222
	Puerro	398	Patata	220
	Cebolleta	353		
Muy bajo	Ajo	183	Pimiento verde	111
	Cebolla	164	Tomate	43
	Berros de agua	136	Guisantes	30
	Pimiento dulce	117		

Las concentraciones de nitratos de estos alimentos pueden verse influenciadas por condiciones de producción agrícola como la estacionalidad, la zona geográfica del cultivo, el tiempo transcurrido desde la cosecha, entre otros [23], por lo que los estudios muestran cierta variabilidad en cuanto a concentraciones de nitratos entre una misma verdura u hortaliza. Además, el procesamiento de los alimentos, el método de cocción y las condiciones de almacenaje son también factores que pueden resultar en un cambio en la concentración de esta sustancia [22]. (Tabla adaptada de [8,24,25]).

La ruta del nitrato-nitrito-óxido nítrico

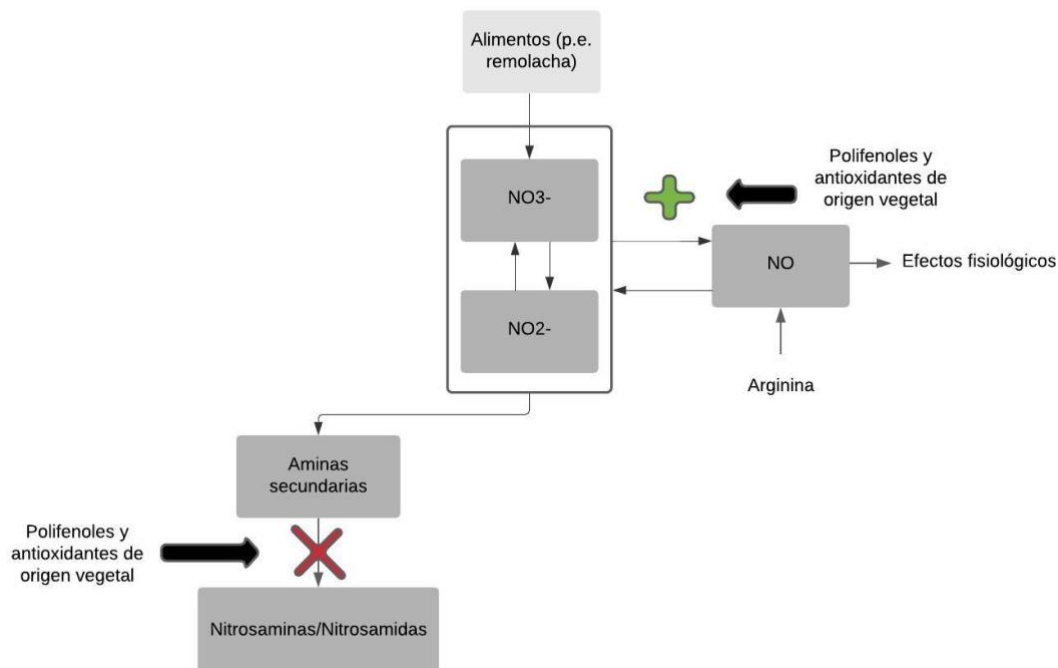
La ruta del nitrato-nitrito-óxido nítrico (Figura 1) es una vía alternativa de síntesis de óxido nítrico (NO), una molécula gaseosa con función señalizadora [26,27]. Se creía que la formación de NO ocurría exclusivamente de forma endógena por la oxidación del aminoácido L-arginina a L-citrulina en una reacción mediada por la enzima óxido nítrico-sintetasa (NOS) dependiente de O₂ [28]. Posteriormente, se descubrió la ruta nitrato-nitrito-óxido nítrico, un sistema alternativo y regulado de forma diferente que ocurre mayoritariamente a partir del NO₃⁻ de los alimentos, y en menor medida a partir del nitrito (NO₂⁻) [20,28].

El NO₃⁻ es absorbido en el tracto gastrointestinal superior a la circulación sanguínea, con una tasa de biodisponibilidad del 100% en el caso de las espinacas y la remolacha cocinadas y la lechuga cruda [24]. Aproximadamente un 25% del NO₃⁻ circulante es absorbido activamente por las glándulas salivales, siguiendo la circulación entero-salival [27,29–31]. El NO₃⁻ concentrado en la saliva es transformado a NO₂⁻ por bacterias anaeróbicas facultativas que viven en nuestra cavidad oral. Se cree que se da una relación de simbiosis facultativa debido a la limitada capacidad de las células de mamíferos de metabolizar y activar de forma eficaz el NO₂⁻ [26]. Consecuentemente, la función que estas bacterias desempeñan en nuestra cavidad oral tiene un papel clave en la bioactivación del NO₃⁻

y cualquier alteración que se podría dar en esta microflora bacteriana supondría la cesión de los efectos cardio-metabólicos del NO₃⁻ [32]. Dicha transformación se da mediante una reacción de reducción que requiere la acción de enzimas nitrato reductasas [21,30].

Parte del NO₂⁻ obtenido sigue un proceso de bioactivación una vez se encuentra en el ambiente gástrico. Esta bioactivación consiste en una reacción mediada por un mecanismo no enzimático dependiente de pH ácido, y resulta en la formación de NO y otras especies reactivas de nitrógeno [29,32]. Este proceso se ve favorecido por una dieta rica en frutas y verduras [28]. Diversos estudios han observado que un patrón dietético que aporta una cantidad significativa de compuestos bioactivos y antioxidantes (polifenoles y vitamina E y C) proveniente de la ingesta de frutas y verduras es capaz de reforzar la conversión gástrica de NO₂⁻ a NO [15,29,33].

La ruta del nitrato-nitrito-óxido nítrico es independiente del O₂, por lo que se ve favorecida por estados de tensión de O₂ bajos [29], como puede ser el caso de un tejido isquémico o el músculo cuando se realiza actividad física, además de ambientes ácidos [12,14,15]. En este sentido, la producción de NO a través de la vía alternativa ocurre en una relación inversa a la cantidad de O₂ disponible, por lo que esta vía supone un sistema de reserva cuando las otras rutas de síntesis se ven limitadas por la baja disponibilidad de O₂ [14,26,32]

Figura 1. Ruta metabólica del nitrato, nitrito y óxido nítrico.

El NO es el principal responsable de los efectos fisiológicos del zumo de remolacha. El organismo utiliza arginina como fuente de NO en una reacción dependiente de O_2 . Sin embargo, el NO también se puede formar después de la ingesta de alimentos ricos en nitrato. El NO_3^- ingerido es reducido a NO_2^- en la cavidad oral y, en condiciones de baja disponibilidad de O_2 pueden ser reducidos a NO. En condiciones ácidas (por ejemplo: estómago) el NO_2^- puede transformarse en nitrosaminas y nitrosamidas, unos compuestos cancerígenos. Los polifenoles y antioxidantes pueden actuar inhibiendo la formación de tales compuestos, favoreciendo la formación de NO. (Figura adaptada de [33,34]).

Óxido nítrico

El NO es una molécula gaseosa con funciones importantes en numerosos procesos como la vasodilatación, el control de la presión sanguínea, la distribución del flujo tisular, la neurotransmisión, la función inmunitaria, la respiración mitocondrial, la contracción del músculo esquelético, la homeostasis del calcio (Ca^{2+}) y de la glucosa, etc. [27,35–37]. Algunas de estas funciones son de gran relevancia en la modulación de ciertas respuestas fisiológicas en

la actividad física, incluyendo la perfusión muscular, el metabolismo energético y la contractibilidad del músculo esquelético [12,14].

Para entender cómo el NO actúa a nivel de los tejidos, se debe tener en cuenta que este tiene una vida media intravascular muy corta, inferior a 2ms, debido a su naturaleza inestable al poseer un radical libre [26]. Por ello, tanto el NO endógeno producido por la ruta L-arginina-NOS-NO como el NO exógeno producido por la ruta del nitrato-nitrito-óxido nítrico es utilizado localmente en el

momento de síntesis o es rápidamente oxidado para formar productos más estables como es el caso del NO_3^- o NO_2^- [30]. Este ciclo de formación y transformación de NO continuo puede ocurrir tanto en sangre como en los tejidos y representa un complejo sistema de absorción, transporte, almacenaje y metabolización exógeno y endógeno de los nitratos [32].

El músculo como reservorio de nitratos

Tanto la producción endógena como exógena de NO ocurre en un sistema abierto y complejo, en compartimentos definidos y bien comunicados, que permiten que los diferentes órganos y tejidos intercambien moléculas por difusión o a través de transportadores [38]. La necesidad de una presencia continua de NO en el organismo con el fin de asegurar una salud cardio-metabólica óptima lleva a pensar que una absorción y excreción rápidas del NO_3^- y NO_2^- son poco probables. Por ello, se ha planteado la hipótesis de la existencia de un “reservorio de NO” a largo plazo situado en los diferentes tejidos [38].

Diferentes estudios han investigado la posibilidad de que el músculo esquelético tenga un rol significativo en el almacenaje del NO_3^- , así como en su producción y metabolismo [36,38]. Wylie et al. [38] ha observado una gran expresión en el músculo de una de las isoformas de la NOS, la nNOS. La medición y comparación de los niveles de NO_3^- en distintos tejidos y en sangre ha permitido constatar que estos son significativamente superiores en el músculo que en otros tejidos. No se ha observado ninguna variación significativa en cuanto a niveles de NO_2^- . Esto confirma la hipótesis de que el músculo esquelético representa un reservorio de NO_3^- .

tanto endógeno como exógeno que puede utilizarse *in situ* o viajar por la sangre para ser utilizado en otros tejidos [38].

Este descubrimiento ha desmentido la creencia de que el NO_3^- es un producto inerte de la oxidación del NO, y que puede ser reducido a NO_2^- y seguidamente a NO [39] en ciertas condiciones fisiológicas y patológicas [3]. Por ello, la posibilidad de aumentar la disponibilidad de NO a través del aumento de las concentraciones plasmáticas de NO_3^- y NO_2^- mediante la ingesta de alimentos ricos en NO_3^- inorgánico ha sido estudiada. Diversos estudios han observado un aumento en las concentraciones plasmáticas de NO_3^- y NO_2^- tras la ingesta de un suplemento de BJ rico en NO_3^- [12,34,35,38–40], confirmando así que una mejora en la disponibilidad de NO a través de alimentos es posible.

¿Qué son las ayudas ergogénicas?

Una ayuda ergogénica puede ser un producto, dispositivo o técnica capaz de reducir el componente fatigante, mejorar las adaptaciones al entrenamiento o disminuir el tiempo de recuperación, prevenir una lesión o disminuir el período de recuperación, con el objetivo final de mejorar el rendimiento deportivo. Algunos ejemplos de ayudas ergogénicas son: la técnica de entrenamiento empleada, un dispositivo mecánico, un ingrediente o práctica nutricional, un método farmacológico, una técnica psicológica, etc. [41,42].

En la última década, debido al gran interés con respecto a estas ayudas, sobre todo en cuanto a ingredientes nutricionales, se han realizado numerosos estudios sobre el valor de ergogénicos

nutricionales. Estas investigaciones buscan establecer si determinados nutrientes tienen un efecto significativo en la adaptación del músculo y en el rendimiento deportivo [3,4,42–44].

El papel del NO₃ dietético en la fisiología del ejercicio

Aunque los mecanismos exactos por los que la suplementación con NO₃ inorgánico ejerce beneficios en la práctica deportiva se han estudiado recientemente, estos aun no se han establecido con certeza [20,36,45,46]. Se sabe que el NO₃ dietético es una fuente exógena de NO₃ que se utiliza en la ruta del nitrato-nitrito-óxido nítrico [39] durante el ejercicio de larga duración y alta intensidad y el ejercicio intermitente de alta intensidad [37]. Esto se debe a que este tipo de actividades hacen del músculo un ambiente hipóxico y ácido, provocando la rotura de la homeostasis e inhibiendo el funcionamiento de la ruta dependiente de O₂ [37].

De esta forma, la continuación del ejercicio depende en gran medida de la ruta alternativa de formación de NO independiente de O₂ [37]. Esta ruta participa en procesos fisiológicos importantes a través del incremento de la disponibilidad de NO [20,39,47], y podría mediar mejoras en la respuesta adaptativa y la tolerancia al ejercicio físico [28,39] y, consecuentemente, tener efectos ergogénicos agudos sobre el rendimiento físico [20,39]. Un aumento en el rendimiento del 0.5-1.5% es considerado significativo, puesto que a partir de este punto ya se pueden observar beneficios atléticos considerados, especialmente en deportistas de élite [35,48].

Estas mejoras parecen ser atribuidas a 1) una disminución en el coste de O₂ [36,39] sin un aumento en la concentración sanguínea de lactato, indicando que el gasto reducido de O₂ después de la ingesta de NO₃ inorgánico no es compensado por una mejora en el recambio de energía [20]; 2) una reducción del VO₂ consumido a cualquier tasa de trabajo, resultando en un coste energético en la producción de fuerza menguado y/o en un rendimiento mejorado de adenosina trifosfato por unidad de O₂ consumido [35]; 3) un aumento en la producción de fuerza desarrollada por las fibras musculares tipo II [16,35,45]; 4) una mejora en la oxigenación de las fibras musculares tipo II [16,45] y/o 5) una eficiencia mitocondrial mejorada [20,28].

El efecto ergogénico de la suplementación con NO₃ a dosis variables (6.4-12.8 mmol de NO₃-) en forma de BJ se ha establecido en individuos activos de forma recreacional y en individuos moderadamente entrenados [20].

La suplementación aguda (2-3 horas antes del ejercicio) mejora el rendimiento deportivo de 0.8 a 2.8% en sujetos moderadamente entrenados [35,48]. De acuerdo con estos resultados, otros estudios han observado un aumento en la potencia máxima y media utilizando una prueba Wingate de 30s [31]. En contraste, otros estudios no han observado una reducción en el tiempo hasta el agotamiento durante ejercicios de corta duración y alta intensidad [38] ni un cambio significativo en el rendimiento en pruebas a contrarreloj [37].

La suplementación crónica (5-28 días) con BJ rico en NO₃ se ha relacionado con una mejora del trabajo total en ejercicios intermitentes prolongados [9,13] y de alta intensidad y corta

duración [11,13], en entrenamientos de intervalos de velocidad [12] y en ejercicios de resistencia de alta intensidad, en sujetos recreacionalmente activos y sanos. Además, se ha observado un incremento de la tolerancia al ejercicio de fuerza de alta intensidad [10,12] y al ejercicio de resistencia y una atenuación en el desarrollo de la fatiga muscular [10,12,49]. Aunque en la mayoría de los casos el consumo de NO₃- dietético se ha relacionado con algún tipo de mejora durante la práctica deportiva en sujetos recreacionalmente activos y sanos, otros estudios no han establecido tales efectos en el rendimiento físico [12,13,48,50,51]. Puesto que los efectos son más probables de observar en sujetos menos entrenados que en sujetos altamente entrenados [35,37] es posible que haya una relación entre el

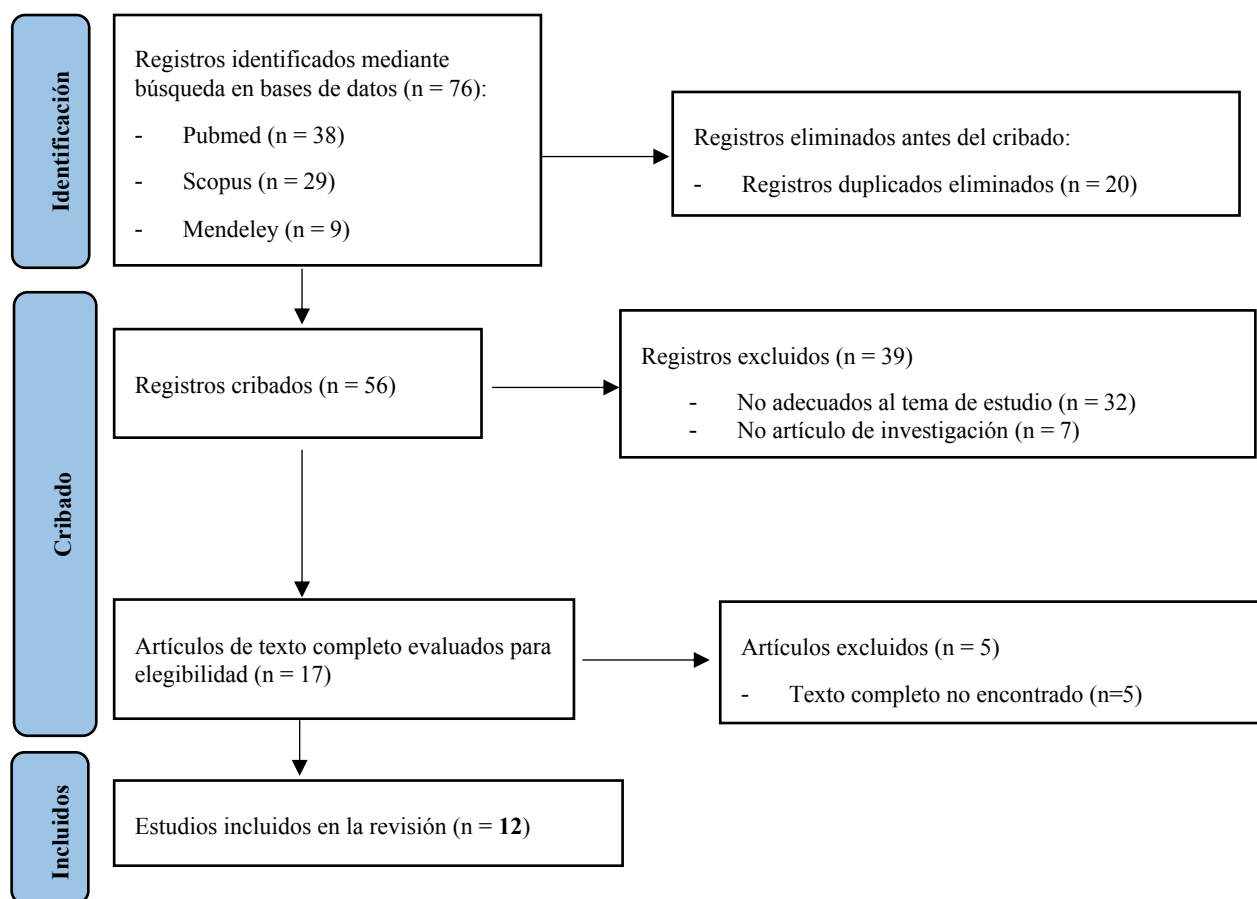
nivel de entrenamiento y la ergogenicidad del NO₃- dietético [37].

RESULTADOS

Selección de estudios

La búsqueda inicial a través de las bases de datos ha proporcionado un total de 76 registros. De estos, 20 duplicados han sido eliminados. De los 56 registros restantes, un total de 39 han sido excluidos después de cribar los títulos y abstractos para elegibilidad. De los 17 restantes, 5 han sido excluidos por no disponer del texto completo. Finalmente, 12 estudios han sido incluidos en esta revisión. En la Figura 2 se resume el proceso de selección a través del diagrama de flujo PRISMA.

Figura 2: Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de los estudios.



Características de los estudios

Los 12 estudios seleccionados para la revisión incluyen un total de 128 sujetos, de los cuales 110 hombres y 18 mujeres. El tamaño medio de los grupos de sujetos incluye 11 participantes. Todos los sujetos de los estudios han sido clasificados por los autores como bien entrenados, competitivamente entrenados o atletas de elite. La mayoría de los estudios se han llevado a cabo en atletas y triatletas ($\approx 58.3\%$) [6,28,35,36,44,52,53]. Los estudios restantes se han centrado en jugadores de tenis ($\approx 16.6\%$) [40,54], ciclistas (16.6%) [14,55] y practicantes de Crossfit ($\approx 8.3\%$) [56].

Todos los estudios incluidos en esta revisión han empleado la suplementación con BJ y han utilizado el mmol como unidad de medida para determinar el valor de la dosis ingerida de NO_3^- . Se han encontrado tanto protocolos de suplementación aguda como crónica en los estudios revisados. Del total de estudios, el 41.66% ha utilizado una pauta de suplementación crónica y el 58.33% una pauta aguda.

Los estudios con un tratamiento crónico [6,14] se llevaron a cabo durante un período medio de 7 días, donde algunos de los protocolos de suplementación duraron 3 días [28,55], y otros 15 días [53]. Las dosis de NO_3^- ingeridas variaron desde 5.5mmol a 12.4mmol. La última dosis de BJ ingerida antes de las pruebas de rendimiento no se ha administrado en el mismo momento en todos los estudios. Los intervalos más utilizados para la administración de la dosis son entre 2 y 3 horas. Solamente un estudio ha evaluado el rendimiento físico después de 24 horas de la última dosis [53].

En la Tabla 2 se resumen los resultados de los estudios y se proporcionan detalles sobre los

participantes, la pauta de suplementación y las pruebas, entre otros.

Riesgo de sesgo

La mayoría de los estudios no presentan riesgo de sesgo, ya que se han llevado a cabo en atletas sanos y no lesionados a través de una prueba control de doble ciego aleatorizada. En todos los estudios el PLA tenía el mismo embalaje, color, olor y sabor que el BJ rico en NO_3^- para reducir el riesgo de sesgo.

Gran parte de los estudios controlaron algunas variables para estandarizar la dieta de los sujetos, así como la rutina de entrenamiento y las condiciones ambientales durante la realización de las pruebas. Se dieron instrucciones a los participantes para abstenerse del consumo de alcohol y cafeína las 6-24h previas a las pruebas, puesto que esta última ha demostrado tener un efecto de mejora en el rendimiento deportivo tras su ingesta [35,44]. Además, se les proporcionó una lista de alimentos ricos en NO_3^- a todos los sujetos y se les indicó que evitaran su consumo las 48-72 horas previas a cada prueba. La mayoría de los participantes mantuvieron la misma carga de entrenamiento durante el período del experimento, en adición de la abstención de la actividad física las últimas 24-72h antes de las pruebas. Los sujetos fueron instruidos a evitar el uso de enjuague bucal y/o goma de mascar para evitar el desequilibrio en la flora bacteriana reductora de nitrato. Por último, en algunos estudios las pruebas se realizaron a la misma hora del día (± 0.5 -1h), para evitar los efectos del ritmo circadiano, y se controlaron variables como la temperatura (19-22.5°C) y la humedad relativa (42-52%).

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos en los estudios revisados.

Referencia	Participantes	Edad (años)	Experiencia/Carga entrenamiento	VO2 _{max} (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	Protocolo de suplementación	Dosis de nitrato (mmol/día)	Última dosis (horas)	Protocolo de ejercicio	Rendimiento	Resultados
Robinson et al. (6)	H, corredores o triatletas de media o larga distancia (n=8)	23±4	Volumen de entrenamiento: 4 sesiones de resistencia a la semana (entrenamiento a intervalos de alta intensidad o entrenamiento continuo submáximo)	52±6	BJ 140ml (7 días)	12.4	3	Protocolo de carrera intermitente de alta intensidad (a 3 altitudes diferentes: 0m, 1200m y 2400m)	SpO ₂ (%) T _{lim} (s)	SpO ₂ : menor a 1200m vs 0m (ES=0.72 vs 0.67); menor a 2400m vs 1200m (ES=0.70 vs 0.78) y 0m (ES=0.89 vs 0.84); D = no T _{lim} : 0m (BJ: 445 [324, 508] vs PLA: 410 [368, 548]); 1200m (BJ: 341 [270, 390] vs PLA: 332 [314, 356]); 2400m (BJ: 233 [177, 323] vs PLA: 251 [221, 323]; D = no
Rokkedal-Lausch et al. (14)	H, ciclistas (n=12)	29±7.7	Nivel de rendimiento 4 (Pauw et al. (56))	66.4±5.3	BJ 140ml (7 días)	12.4	2.75	Prueba de tiempo 10km (normoxia e hipoxia)	Producción de fuerza (watt) Tiempo (s) VO _{2max} (%)	Producción de fuerza: - Normoxia: (BJ: 315.8±13.2 vs PLA: 311.3±13.2); D = si - Hipoxia: (BJ: 269.3±13.2 vs PLA: 264.4±13.2); D = si Tiempo: - Normoxia: (BJ: 884.5.1±16 vs PLA: 890.1±16); D = si - Hipoxia: (BJ: 939.9±16 vs PLA: 945.6±16); D = si VO _{2max} : - Normoxia: (BJ: 87.4±1.6 vs PLA: 85.9±1.6); D = si - Hipoxia: (BJ: 77.7±1.7 vs PLA: 75.8±1.7); D = si
Pawlak-Chaouch et al. (28)	H, atletas de resistencia (n=9)	21.7±3.7	Atletas de elite en carrera competitiva o triatlones	71.1±5.2	BJ (3 días)	5.5	2	Prueba de ciclismo de esfuerzo máximo incremental (15s a 17°0% + 30s descanso) hasta agotamiento	Repeticiones VO ₂ (mL·min ⁻¹)	Repeticiones: (BJ: 13.9±4 vs PLA: 14.2±4.5); D = no VO ₂ : (BJ: 3378.5±681.8 vs PLA: 3466.1±505.3); D = no

Sprenger et al. (35)	H, triatletas (n=4)	22±0.9	Triatletas de elite a nivel nacional y competición internacional y mundial	-	BJ 210ml (1 día)	19.4	2.5	Prueba de tiempo 30min	Producción de fuerza media (W/kg)	Producción de fuerza media: (BJ: 4.19±0.2 vs PLA: 4.23±0.2); D = no
	Distancia cubierta (km)								Distancia cubierta: (BJ: 16.1±0.6 vs PLA: 16.2±0.7); D = no	
	Velocidad media (kph)								Velocidad media: (BJ: 32.6±1.3 vs PLA: 32.4±1.4); D = no	
Garnacho-Castaño et al. (36)	H, triatletas (n=12)	21-47	Bien entrenados, triatletas a nivel nacional e internacional	-	BJ 70ml (1 día)	6.5	3	Prueba de resistencia (ciclo-ergometro) a tasa de trabajo constante (W) (VT1) (30min), (VT2) (15min)	FC (latidos·seg ⁻¹)	FC:
									VO ₂ (L·min ⁻¹) (SD)	- VT1: (BJ 130.7 vs PLA: 129.4); D = no
										- VT2: (BJ: 159.6 vs PLA: 160.0); D = no
										VO ₂ :
										- VT1: (BJ: 2.4 vs PLA: 2.4); D = no
	- VT2: (BJ: 3.4 vs PLA: 3.3); D = no									
Fernández-Elias et al. (40)	H, jugadores de tenis (n=9)	24.9±4.2	Jugadores profesionales de tenis	-	BJ 70ml (1 día)	6.4	3	Partido de tenis (3 sets)	Duración partido (min)	Duración partido: (BJ: 72.5±20.3 vs PLA: 76.6±12); D = no
			Experiencia: 15.4±6.1 Volumen de entrenamiento: 11.8±2.7h/semana					Pruebas de rendimiento (pre y post partido): velocidad de saque (x5) + fuerza de empuñadura isométrica (x2)	Distancia total recorrida (m·min ⁻¹)	Distancia total recorrida: (BJ: 46.4±25.3 vs PLA: 48.2±20.2); D = no
									RPE	Tasa de esfuerzo percibida: (BJ: 5.3±1.4 vs PLA: 5.0±0.7); D = no
									Velocidad de saque (km·h ⁻¹)	Velocidad de saque (diferencia pre y post partido): (BJ: -1.5% vs PLA: -2.7%); D = no
									Fuerza de empuñadura (N)	Fuerza de empuñadura (diferencia pre y post partido): (BJ: -0.7% vs PLA: 2.3%); D = no
Glaister et al. (44)	M, atletas (n=14)	31±7	Atletas bien entrenadas, competitivas	-	BJ 70ml (1 día)	7.3	2.5	Prueba de tiempo 20km	Tiempo (min)	Tiempo: (BJ: 35.33±1.50 vs PLA: 35.37±0.38); D = no
			Experiencia: activamente involucradas por 13 años Volumen de entrenamiento: 10.7±2.2h/semana						Cadencia (rpm)	Cadencia: (BJ: 96.6±5.8 vs PLA: 97.9±8.6); D = no
									VO ₂ (L·min ⁻¹)	VO ₂ : (BJ: 2.67±0.32 vs PLA: 2.63±0.41); D = no
										RPE

Serra-Payá et al. (52)	H, atletas (n=11)	29.2±3.7	Bien entrenados en ejercicios de fuerza Experiencia: >2 años en ejercicios de fuerza	-	BJ 140ml (1 día)	12.8	3	Pruebas de ejercicios de fuerza: T1 (90s WBS 10kg+3min descanso+60s FS 50% de 1RM); T2 (90s WBS 10kg+60s FS 50% 1RM)	Peso total levantado (kg)	WBS: - T1 (BJ vs PLA); D = no - T2 (BJ vs PLA); D = no FS: - T1 (BJ vs PLA); D = si - T2 (BJ vs PLA); D = no
López-Samanes et al. (54)	H, jugadores de tenis (n=13)	25.4±5.1	Tenistas bien entrenados, altamente competitivos Experiencia: 14.9±7.4 años Carga de entrenamiento: 12.2±3.1h/semana	-	BJ 70ml (1 día)	6.4	3	Pruebas neuromusculares: SVT (T1), CMJ (T2), IHS (T3), test agilidad 5-0-5 (T4), sprint 10m (T5)	T1: velocidad (km/h) T2: altura (cm) T3: fuerza (kg) T4: tiempo (s) T5: tiempo (s)	T1: velocidad (D = no) T2: altura (D = no) T3: fuerza (D = no) T4: tiempo (D = no) T5: tiempo (D = no)
Balsalobre-Fernández et al. (53)	H, corredores de corta y larga distancia (n=12)	26.3±5.1	Corredores de elite de corta y larga distancia, competidores a nivel nacional e internacional	71.8±5.2	BJ 70ml (15 días)	6.5	24	Prueba de carrera incremental. 3x3min (15, 17.1 y 20km/h)	TE _x (s) Economicidad carrera (VO ₂) (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹) SmO ₂ (%) Rigidez pierna (kN/m) RPE	VO ₂ : (BJ: 70.1+7.0 vs PLA: 74.9+6.1); D = no RPE: (BJ: -1.56 [-2.86, -0.26]); D = si SmO₂: (BJ: 0.67 [-0.01, 1.35]); D = si TE_x: (BJ: 1269.0±53.5 vs PLA: 1230±73.5); D = si Rigidez pierna: (BJ: 8.8±1.3 vs PLA: 8.3±1.2); D = no
McQuillan et al. (55)	H, ciclistas (n=8)	25±8	Ciclistas de resistencia competitivos	64±5	BJ 140ml (3 días)	8	1.5	2x10min combates a 40 y 60% PPO + prueba de tiempo 4km	PPO (W)	(BJ: 337±50 vs PLA: 336±45); D = no
Garnacho-Castaño et al. (56)	H, practicantes Crossfit p(n=12)	29.5±4.3	Bien entrenados, practicantes de Crossfit	-	BJ 140ml (1 día)	12.8	3	Pruebas: T1 (WBS+3min descanso+FS), T2 (WBS+FS)	Repeticiones (n°) SpO ₂ (%)	Repeticiones: - T1: (BJ: 80 vs PLA: 75); D = si - T2 (BJ: 60 vs PLA: 58); D = no SpO₂: (BJ: -3.38 vs PLA: -2.69); D = si

H=hombres; M=mujeres; BJ=zum de remolacha; PLA=placebo; SpO₂=saturación de oxígeno arterial; T_{lim}=tiempo hasta agotamiento; D=diferencia estadística; T=prueba; rpm=revoluciones por minuto; RPE: tasa de esfuerzo percibida; VO₂=consumo de oxígeno; FS=sentadilla completa; WBS=tiros de bola a la pared; RM=repeticón máxima; SVT: prueba velocidad de saque; CMJ=salto de contramovimiento; IHS=fuerza de empuñadura isométrica; TE_x=tiempo hasta agotamiento; SmO₂=saturación del oxígeno del vasto lateral; PPO=potencia máxima; SD=desviación estándar.

Efectos de grupo

Se han observado incrementos significativos ($p < 0.05$) después de la suplementación con BJ en las concentraciones plasmáticas de NO_2^- y/o NO_3^- [6,14,28,35,44,52,55,56]. De los doce artículos, cuatro mostraron mejoras significantes en algún parámetro de rendimiento [14,52,53,56]. En la Tabla 2 se indican estas mejoras.

Efectos adversos

Las dosis de suplementación con NO_3^- han sido bien toleradas en todos los estudios. En algunos casos, los sujetos presentaron beeturia y/o heces rojas [36,40,52,55,56]. Aún así, no se observaron efectos secundarios adversos.

DISCUSIÓN

De acuerdo con la literatura disponible, la ergogenicidad de la suplementación con BJ rico en NO_3^- en atletas bien entrenados, competitivos y/o de élite es limitada y observable en pocos casos [6,14,20,28,35–37,40,44,52,53,56]. El análisis para la influencia de la ingesta de BJ en el rendimiento señala un efecto pequeño, pero estadísticamente significativo en comparación con el PLA solo en cuatro de los estudios revisados [14,52,53,56].

Se han observado efectos ergogénicos con una pauta de suplementación aguda con 140ml de BJ (12.8mmol NO_3^-) en sujetos bien entrenados en ejercicios de fuerza. Serra-Payá et al. [52] y Garnacho-Castaño et al. [56] sugieren una relación causal entre la ingesta aguda de BJ y la mejora del rendimiento en ejercicios de fuerza de alta intensidad solo después de un período de descanso entre ejercicios. La capacidad de repetir ejercicios a una alta intensidad depende directamente de la ratio de

resíntesis de fosfocreatina (PCr), que viene determinada por la cantidad de flujo sanguíneo que llega al músculo y, consecuentemente, por la cantidad de O_2 disponible [57]. Como se ha comentado anteriormente, el músculo representa un ambiente ácido e hipóxico durante la práctica de ejercicio físico, por lo que la ingesta de alimentos ricos en nitratos es posible que aumente la disponibilidad de NO a partir del NO_3^- durante el trabajo pesado del músculo esquelético y retrase la aparición de la fatiga a través de la regulación del flujo sanguíneo en el músculo esquelético y el subministro de O_2 [34,56,58,59]. Consecuentemente, el descanso después de la ejecución de un ejercicio de fuerza parece tener un papel clave en la mejora de la disponibilidad de NO en condiciones de baja disponibilidad de O_2 .

Una pauta de suplementación crónica con 70 y 140ml de BJ (correspondiente a 6.5 y 12.4mmol de NO_3^- , respectivamente) también ha demostrado tener efectos ergogénicos en ciclistas y corredores de media y larga distancia durante ejercicios aeróbicos de alta intensidad [14,53]. Los resultados de los estudios sugieren que la suplementación con BJ resulta en un uso mejorado de la capacidad aeróbica a través de un mayor VO_2 durante el ejercicio, y una disminución significativa en la RPE [14]. Por otro lado, el tamaño de los efectos observados en diferentes medidas fisiológicas, tales como la economicidad durante el ejercicio y el VO_2 , es mínimo y estadísticamente insignificante [53]. Por último, no parece haber una relación directa entre el tiempo de suplementación y el nivel de adaptaciones o mejoras en el ejercicio aeróbico de alta intensidad, puesto que los beneficios no se multiplican después de un período de suplementación crónico más largo (15 días).

Estudios realizados en sujetos recreacionalmente activos y/o moderadamente entrenados han observado mejoras estadísticamente significativas en el rendimiento físico incluso después de dosis bajas de NO_3^- (≈ 6.5 mmol) [9–13,31,37,48,49]. Esto lleva a pensar que el nivel de entrenamiento de los sujetos es un factor diferencial y que los atletas altamente entrenados son menos sensibles a las propiedades ergogénicas del NO_3^- . Es posible que una síntesis endógena de NO junto a una ingesta de nitrato dietético superiores y una adaptación al ejercicio optimizado en atletas altamente entrenados puedan explicar la falta de respuesta en este tipo de sujetos [60]. De acuerdo con dos de los estudios revisados [35,44], Porcelli et al. [20] sugiere que los atletas de resistencia altamente entrenados tienen unas concentraciones base de NO_2^- y NO_3^- superiores y muestran un incremento no significativo de los niveles plasmáticos tras la ingesta de NO_3^- . Consecuentemente, la respuesta ergogénica en atletas altamente entrenados es reducida.

En contraste, otros estudios sí han observado un incremento significativo en las concentraciones plasmáticas de NO_2^- y/o NO_3^- tras la ingesta de BJ concentrado en sujetos altamente entrenados [6,14,28,35,44,52,55,56]. Jonvik et al. [60] ha observado que una suplementación de seis días con BJ rico en NO_3^- aumenta considerablemente las concentraciones plasmáticas de NO_3^- , sin diferencias entre atletas recreacionales, competitivos o de élite, con efectos similares del BJ en todos los parámetros Wingate para las tres categorías de atletas. Sin embargo, los sujetos participantes pertenecían a dos modalidades deportivas diferentes (atletas de resistencia vs. atletas de velocidad). Puesto que los atletas de velocidad tienen una proporción mayor de

fibras musculares tipo II en comparación con los atletas de resistencia, es posible que estos primeros tengan una mayor respuesta tras la suplementación con NO_3^- . Siguiendo este razonamiento, es posible que los deportistas de disciplinas de alta intensidad y/o de disciplinas de velocidad, que tengan una mayor proporción de fibras musculares tipo II, puedan beneficiarse del efecto ergogénico del NO_3^- .

Se observa una clara subrepresentación de las mujeres en los estudios de la suplementación con NO_3^- . En los estudios revisados, el género femenino representa $\approx 13\%$ de la muestra total, y solamente uno de los doce estudios se ha realizado exclusivamente en mujeres, sin observar ningún efecto ergogénico tras la suplementación con BJ rico en NO_3^- [44]. Por ello, no se puede afirmar que el NO_3^- dietético es una ayuda ergogénica viable en mujeres atletas. No obstante, Coggan et al. [18] sugiere que, en términos de mejora en la fuerza neuromuscular, las mujeres son más susceptibles a beneficiarse de los efectos de la suplementación con NO_3^- que los hombres.

La pauta de suplementación que ha obtenido efectos significativos en el rendimiento consta de dosis de BJ administradas de forma aguda o crónica que varían desde 6.5mmol a 12.8mmol de NO_3^- . Aún así, parece ser que dosis elevadas de NO_3^- resultan ser más efectivas, puesto que la mayoría de los estudios que utilizan dosis bajas (6.5-8mmol) no han observado efectos ergogénicos estadísticamente significativos en el rendimiento deportivo de atletas bien entrenados o de élite [28,36,40,44,54,55]. Esta información puede resultar útil para el diseño de futuros estudios que tienen como objetivo investigar los efectos de la suplementación con NO_3^- en atletas entrenados en diferentes modalidades deportivas.

Aunque el tamaño del efecto es pequeño, puesto que un gran número de estudios ($\approx 67\%$) no observan un efecto ergogénico estadísticamente significativo tras la suplementación con NO_3^- , los datos revisados en el presente estudio muestran una mejora cuantitativa del 0.8-1% en el rendimiento en diferentes modalidades de ejercicios y escenarios. En el contexto de una competición atlética, un efecto ergogénico de 0.6% puede representar un beneficio altamente significativo. Por ejemplo, durante el Giro de Italia y el Tour de Francia en 2019, una diferencia de tiempo del 0.3 y 0.4%, respectivamente, separaron la primera y segunda posición [37]. En consecuencia, aunque el tamaño del efecto sea pequeño e insignificante, el NO_3^- dietético podría representar una ayuda ergogénica viable en el contexto de una competición de élite.

Estudios indican que el consumo de vegetales de hoja verde (espinaca, ensalada de rúcula, lechuga) y remolacha, representa entre el 50-85% de la ingesta media diaria de NO_3^- . [61,62]. Un estudio ha determinado que la ingesta de verduras asociada al consumo de nitrato en un grupo de atletas altamente entrenados y ha observado una ingesta media habitual de 132 [0-858] g/día de verdura y 106 [19-525] mg/día de NO_3^- , con grandes variaciones interindividuales [62].

Teniendo en cuenta que dosis agudas o una ingesta crónica de ≈ 6.5 -13mmol (390-780mg/día) de NO_3^- ha demostrado tener efectos ergogénicos significativos [14,52,53,56], una ingesta media de 132g/día de verduras, exclusivamente a partir de ensalada de rúcula, supondría una ingesta de ≈ 344 mg de NO_3^- , que representaría entre el 44-88% de la dosis de NO_3^- requerida. Este escenario no refleja la realidad y la cantidad ingerida no sería suficiente para obtener una

mejora del rendimiento físico en atletas competitivos y/o de élite.

Dado que la cantidad de frutas y verduras recomendada por la FAO y la OMS es de 600g (lo equivalente a 5 raciones) [63,64] ¿sería posible utilizar la modulación de la dieta como una estrategia alternativa para la suplementación con nitratos? En el Anexo I de la presente revisión se han desarrollado unas preparaciones culinarias con el objetivo de determinar si esta estrategia nutricional se podría poner en práctica. Combinando diversas frutas y verduras con NO_3^- , se podría llegar a consumir una cantidad aproximada de 550-650mg de NO_3^- (≈ 9 -11mmol) al día. Según los datos de esta revisión, dicha cantidad ingerida de forma aguda o crónica podría ser suficiente para obtener beneficios en el rendimiento físico. Aún así, alcanzar una ingesta crónica exclusivamente a partir de los alimentos presentes en la Tabla 1 sería una estrategia poco realista, dado que limitaríamos la ingesta de muchas otras frutas y verduras comunes en nuestra dieta.

Puesto que la ingesta de frutas y verduras no representa el 100% del consumo de NO_3^- en la dieta, se podrían alcanzar tales niveles combinando tanto frutas y verduras ricas y bajas en NO_3^- junto a otras fuentes alimentarias ricas en NO_3^- . Aún así, la exposición a nitrato dietético a través de carnes curadas y procesadas y quesos procesados se ha asociado a con efectos negativos para la salud [65,66].

CONCLUSIÓN

En conclusión, el efecto de la suplementación con nitrato dietético es más probable ser observado en atletas de poco a moderadamente entrenados. Los resultados de esta revisión sugieren que como más alto es el nivel de entrenamiento de un atleta, menor

será la magnitud de la mejora del rendimiento en el ejercicio. Asimismo, estos beneficios también parecen estar influenciados por la dosis administrada de NO_3^- , el diseño de las pruebas utilizadas y diferencias interindividuales.

A pesar de no observar mejoras estadísticamente significativas, en la mayoría de los casos sí se aprecian diferencias en cuanto a parámetros de rendimiento entre los grupos suplementados con BJ y PLA. En el rendimiento hasta el cambio más pequeño puede ser significativo para los atletas de élite, puesto que incluso una mejora del 0.6% puede marcar la diferencia entre el primer puesto y el segundo en una competición profesional.

Son necesarios más estudios que incorporen grupos de sujetos más grandes y que incluyan más sujetos de sexo femenino para entender la estrategia de suplementación óptima en atletas entrenados competitivamente y en qué condiciones es más probable que el nitrato dietético sea más efectivo en la mejora del rendimiento físico.

Estos resultados podrían tener unas aplicaciones prácticas potenciales en deportes de fuerza con períodos de descanso entre ejercicios y en ejercicios aeróbicos de alta intensidad. Algunos de los individuos que podrían beneficiarse de estos efectos son corredores y ciclistas de élite de distancia y atletas de fuerza que buscan estrategias nutricionales para mejorar su rendimiento, empleando la modulación de la dieta como una herramienta práctica para dicho fin. No obstante, ingerir de forma crónica dosis elevadas exclusivamente a partir del consumo de frutas y verduras ricas en NO_3^- podría no ser una estrategia nutricional acorde a las elecciones alimentarias habituales de la población.

ABREVIATURAS

NO_3^-	Nitrato
BJ	Zumo de remolacha
PL	Nivel de rendimiento
PLA	Placebo
NO	Óxido nítrico
NOS	Óxido nítrico-sintetasa
O_2	Oxígeno
NO_2^-	Nitrito
Ca^{2+}	Calcio
VO_2	Consumo de oxígeno
PCr	Fosfocreatina
RPE	Tasa de esfuerzo percibida

REFERENCIAS

1. Close GL, Hamilton DL, Philp A, Burke LM, Morton JP. New strategies in sport nutrition to increase exercise performance. *Free Radical Biology and Medicine* [Internet]. Elsevier; 2016;98:144–58. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.01.016>
2. McMahon NF, Leveritt MD, Pavey TG. The Effect of Dietary Nitrate Supplementation on Endurance Exercise Performance in Healthy Adults : A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports*

Medicine. Springer International Publishing; 2017;47:735–56.

3. Stecker RA, Harty PS, Jagim AR, Candow DG, Kerksick CM. Timing of ergogenic aids and micronutrients on muscle and exercise performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. Journal of the International Society of Sports Nutrition; 2019;16:1–8.

4. Senefeld JW, Wiggins CC, Regimbal RJ, Dominelli PB, Baker SE, Joyner MJ. Ergogenic Effect of Nitrate Supplementation: A Systematic Review and Meta-analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Lippincott Williams and Wilkins; 2020. p. 2250–61.

5. van de Walle GP, Vukovich MD. The effect of nitrate supplementation on exercise tolerance and performance: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Strength and Conditioning Research*. NSCA National Strength and Conditioning Association; 2018;32:1796–808.

6. Robinson GP, Killer SC, Stoyanov Z, Stephens H, Read L, James LJ, et al. Influence of dietary nitrate supplementation on high-intensity intermittent running performance at different doses of normobaric hypoxia in endurance-trained males. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. Human Kinetics Publishers Inc.; 2021;31:1–8.

7. Wylie LJ, Bailey SJ, Kelly J, Blackwell JR, Vanhatalo A, Jones AM. Influence of beetroot juice supplementation on intermittent exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*. Springer Verlag; 2016;116:415–25.

8. Calvo JL, Alorda-Capo F, Pareja-Galeano H, Jiménez SL. Influence of nitrate supplementation on endurance cyclic sports performance: A systematic review. *Nutrients*. MDPI AG; 2020. p. 1–20.

9. Thompson C, Wylie LJ, Fulford J, Kelly J, Black MI, McDonagh STJ, et al. Dietary nitrate improves sprint performance and cognitive function during prolonged intermittent exercise. *European Journal of Applied Physiology* [Internet]. Springer Berlin Heidelberg; 2015 [cited 2021 Jun 7];115:1825–34. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s00421-015-3166-0>

10. Husmann F, Bruhn S, Mittlmeier T, Zschorlich V, Behrens M. Dietary nitrate supplementation improves exercise tolerance by reducing muscle fatigue and perceptual responses. *Frontiers in Physiology*. 2019;10.

11. Thompson C, Vanhatalo A, Jell H, Fulford J, Carter J, Nyman L, et al. Nitric Oxide Dietary nitrate supplementation improves sprint and high-intensity intermittent running performance. *Nitric Oxide* [Internet]. Elsevier Inc; 2016 [cited 2021 Jun 7];61:55–61. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.niox.2016.10.006>

12. Thompson C, Wylie LJ, Blackwell JR, Fulford J, Black MI, Kelly J, et al. Influence of dietary nitrate supplementation on physiological and muscle metabolic adaptations to sprint interval training. *Journal of Applied Physiology*. American Physiological Society; 2017;122:642–52.

13. Esen O, Nicholas C, Morris M, Bailey SJ. No effect of beetroot juice supplementation on 100-m and 200-m swimming performance in moderately trained swimmers. *International Journal of Sports*

Physiology and Performance. Human Kinetics Publishers Inc.; 2019;14:706–10.

14. Rokkedal-Lausch T, Franch J, Poulsen MK, Thomsen LP, Weitzberg E, Kamavuako EN, et al. Chronic high-dose beetroot juice supplementation improves time trial performance of well-trained cyclists in normoxia and hypoxia. *Nitric Oxide - Biology and Chemistry*. 2019;85.

15. Jones AM, Ferguson SK, Bailey SJ, Vanhatalo A, Poole DC. Fiber Type-Specific Effects of Dietary Nitrate. *Exercise and Sport Sciences Reviews*. 2016;44:53–60.

16. Reynolds CME, Evans M, Halpenny C, Hughes C, Jordan S, Quinn A, et al. Acute ingestion of beetroot juice does not improve short-duration repeated sprint running performance in male team sport athletes. *Journal of Sports Sciences* [Internet]. Routledge; 2020;38:2063–70. Available from: <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1770409>

17. Jones AM, Ambientes C, Unido R. Precursores de óxido nítrico en la dieta y rendimiento en el ejercicio. 2016;28:1–6.

18. Coggan AR, Broadstreet SR, Mikhalkova D, Bole I, Leibowitz JL, Kadkhodayan A, et al. Dietary nitrate-induced increases in human muscle power: high versus low responders. *Physiological Reports*. 2018;6.

19. de Pauw K, Roelands B, Cheung SS, de Geus B, Rietjens G, Meeusen R. Guidelines to classify subject groups in sport-science research. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. 2013;8:111–22.

20. Porcelli S, Ramaglia M, Bellistri G, Pavei G, Pugliese L, Montorsi M, et al. Aerobic fitness affects

the exercise performance responses to nitrate supplementation. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Lippincott Williams and Wilkins; 2015;47:1643–51.

21. DeMartino AW, Kim-Shapiro DB, Patel RP, Gladwin MT. Nitrite and nitrate chemical biology and signalling. *British Journal of Pharmacology*. 2019;176:228–45.

22. Keller RM, Beaver L, Prater MC, Hord NG. Dietary Nitrate and Nitrite Concentrations in Food Patterns and Dietary Supplements. *Nutrition Today*. 2020;55.

23. Jones AM, Vanhatalo A, Seals DR, Rossman MJ, Pikhova B, Jonvik KL. Dietary Nitrate and Nitric Oxide Metabolism : 2021;280–94.

24. Lidder S, Webb AJ. Vascular effects of dietary nitrate (as found in green leafy vegetables and beetroot) via the nitrate-nitrite-nitric oxide pathway. *British Journal of Clinical Pharmacology*. 2013;75.

25. Alexander J, Benford D, Cockburn A, Cravedi J, Dogliotti E, Domenico A di, et al. Nitrate in vegetables - Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food chain. *EFSA Journal*. 2008;6:1–79.

26. Jones AM, Vanhatalo A, Seals DR, Rossman MJ, Pikhova B, Jonvik KL. Dietary Nitrate and Nitric Oxide Metabolism: Mouth, Circulation, Skeletal Muscle, and Exercise Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. Lippincott Williams and Wilkins; 2021;53:280–94.

27. McDonagh STJ, Wylie LJ, Webster JMA, Vanhatalo A, Jones AM. Nitric Oxide Influence of dietary nitrate food forms on nitrate metabolism and blood pressure in healthy normotensive adults. *Nitric*

- Oxide [Internet]. Elsevier; 2018;72:66–74. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.niox.2017.12.001>
28. Pawlak-Chaouch M, Boissière J, Munyaneza D, Gamelin FX, Cuvelier G, Berthoin S, et al. Beetroot Juice Does Not Enhance Supramaximal Intermittent Exercise Performance in Elite Endurance Athletes. *Journal of the American College of Nutrition*. Routledge; 2019;38:729–38.
 29. Lundberg JO, Weitzberg E, Gladwin MT. The nitrate – nitrite – nitric oxide pathway in physiology and therapeutics. 2008;7:156–67.
 30. Jones AM. Dietary Nitrate Supplementation and Exercise Performance. 2014;44.
 31. Cuenca E, Jodra P, Pérez-López A, González-Rodríguez LG, da Silva SF, Veiga-Herreros P, et al. Effects of beetroot juice supplementation on performance and fatigue in a 30-s all-out sprint exercise: A randomized, double-blind cross-over study. *Nutrients*. MDPI AG; 2018;10:1–12.
 32. Weitzberg E, Lundberg JO, Carlstro M. Review Metabolic Effects of Dietary Nitrate in Health and Disease. 2018;9–22.
 33. Zamani H, de Joode MEJR, Hossein IJ, Henckens NFT, Guggeis MA, Berends JE, et al. The benefits and risks of beetroot juice consumption: a systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Bellwether Publishing, Ltd.; 2021. p. 788–804.
 34. Domínguez R, Maté-Muñoz JL, Cuenca E, García-Fernández P, Mata-Ordoñez F, Lozano-Estevan MC, et al. Effects of beetroot juice supplementation on intermittent high-intensity exercise efforts. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. Journal of the International Society of Sports Nutrition; 2018;15:2.
 35. Sprenger HM L, SL L. Acute Dose of Beet Root Juice Does Not Improve Endurance Performance in Elite Triathletes. *Sports Nutrition and Therapy*. 2016;1:1–5.
 36. Garnacho-Castaño MV, Palau-Salvà G, Cuenca E, Muñoz-González A, García-Fernández P, del Carmen Lozano-Estevan M, et al. Effects of a single dose of beetroot juice on cycling time trial performance at ventilatory thresholds intensity in male triathletes. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. BioMed Central Ltd.; 2018;15.
 37. Hlinský T, Kumstát M, Vajda P. Effects of dietary nitrates on time trial performance in athletes with different training status: Systematic review. *Nutrients*. 2020;12:1–18.
 38. Wylie LJ, Park JW, Vanhatalo A, Kadach S, Black MI, Stoyanov Z, et al. Human skeletal muscle nitrate store : influence of dietary nitrate supplementation and exercise. 2019;23:5565–76.
 39. Nyakayiru J, Jonvik KL, Trommelen J, Pinckaers PJM, Senden JM, van Loon LJC, et al. Beetroot juice supplementation improves high-intensity intermittent type exercise performance in trained soccer players. *Nutrients*. MDPI AG; 2017;9.
 40. Fernández-Elías VE, Courel-Ibáñez J, Pérez-López A, Jodra P, Moreno-Pérez V, Coso J del, et al. Acute Beetroot Juice Supplementation Does Not Improve Match-Play Activity in Professional Tennis Players. *Journal of the American College of Nutrition*. Routledge; 2020;
 41. Thein LA, Thein JM, Landry GL. Ergogenic Aids. *Physical Therapy*. 1995;75.

42. Peeling P, Binnie MJ, Sim M, Burke LM. Evidence-Based Supplements for the Enhancement of Athletic Performance. 2018;178–87.
43. Porrini M, del Bo C. Ergogenic Aids and Supplements. *Frontiers of Hormone Research*. 2016;47.
44. Glaister M, Pattison JR, Muniz-Pumares D, Patterson SD, Foley P. Effects of dietary nitrate, caffeine, and their combination on 20-km cycling time trial performance. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 2015;29.
45. Hernández A, Schiffer TA, Ivarsson N, Cheng AJ, Bruton JD, Lundberg JO, et al. Dietary nitrate increases tetanic $[Ca^{2+}]_i$ and contractile force in mouse fast-twitch muscle. *Journal of Physiology*. 2012;590:3575–83.
46. Haider G, Folland JP. Nitrate supplementation enhances the contractile properties of human skeletal muscle. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2014;46:2234–43.
47. Rimer EG, Peterson LR, Coggan AR, Martin JC. Acute Dietary Nitrate Supplementation Increases Maximal Cycling Power in Athletes. *Int J Sport Physiol Perform*. 2015;Epub Ahead.
48. de Castro TF, Manoel F de A, Figueiredo DH, Figueiredo DH, Machado FA. Effect of beetroot juice supplementation on 10-km performance in recreational runners. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism*. Canadian Science Publishing; 2019;44:90–4.
49. Lansley KE, Winyard PG, Fulford J, Vanhatalo A, Bailey SJ, Blackwell JR, et al. Dietary nitrate supplementation reduces the O_2 cost of walking and running : a placebo-controlled study. 2021;591–600.
50. Jonvik KL, Hoogervorst D, Peelen HB, de Niet M, Verdijk LB, van Loon LJC, et al. The impact of beetroot juice supplementation on muscular endurance, maximal strength and countermovement jump performance. *European journal of sport science* [Internet]. Taylor and Francis Ltd.; 2020 [cited 2021 Jun 7];1–8. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32594854>
51. Wickham KA, McCarthy DG, Pereira JM, Cervone DT, Verdijk LB, van Loon LJC, et al. No effect of beetroot juice supplementation on exercise economy and performance in recreationally active females despite increased torque production. *Physiological Reports*. American Physiological Society; 2019;7.
52. Serra-Payá N, Garnacho-Castaño MV, Sánchez-Nuño S, Albesa-Albiol L, Girabent-Farrés M, Arcone LM, et al. The relationship between resistance exercise performance and ventilatory efficiency after beetroot juice intake in well-trained athletes. *Nutrients*. MDPI AG; 2021;13.
53. Balsalobre-Fernández C, Romero-Moraleda B, Cupeiro R, Peinado AB, Butragueño J, Benito PJ. The effects of beetroot juice supplementation on exercise economy, rating of perceived exertion and running mechanics in elite distance runners: A double-blinded, randomized study. *PLoS ONE*. Public Library of Science; 2018;13:1–10.
54. López-Samanes Á, Pérez-López A, Moreno-Pérez V, Nakamura FY, Acebes-Sánchez J, Quintana-Milla I, et al. Effects of beetroot juice ingestion on physical performance in highly competitive tennis players. *Nutrients*. MDPI AG; 2020;12:1–10.

55. McQuillan JA, Casadio JR, Dulson DK, Laursen PB, Kilding AE. The effect of nitrate supplementation on cycling performance in the heat in well-trained cyclists. *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Human Kinetics Publishers Inc.; 2018;13:50–6.
56. Garnacho-Castaño MV, Palau-Salvà G, Serra-Payà N, Ruiz-Hermosel M, Berbell M, Viñals X, et al. Understanding the effects of beetroot juice intake on CrossFit performance by assessing hormonal, metabolic and mechanical response: a randomized, double-blind, crossover design. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. BioMed Central Ltd; 2020;17.
57. Haseler LJ, Hogan MC, Richardson RS. Skeletal muscle phosphocreatine recovery in exercise-trained humans is dependent on O₂ availability. *Journal of Applied Physiology*. 1999;86.
58. Jubrias SA, Crowther GJ, Shankland EG, Gronka RK, Conley KE. Acidosis inhibits oxidative phosphorylation in contracting human skeletal muscle in vivo. *Journal of Physiology*. 2003;553.
59. Modin A, Björne H, Herulf M, Alving K, Weitzberg E, Lundberg JON. Nitrite-derived nitric oxide: A possible mediator of “acidic-metabolic” vasodilation. *Acta Physiologica Scandinavica*. 2001;171.
60. Jonvik KL, Nyakayiru J, van Dijk JW, Maase K, Ballak SB, Senden JMG, et al. Repeated-sprint performance and plasma responses following beetroot juice supplementation do not differ between recreational, competitive and elite sprint athletes. *European Journal of Sport Science*. 2018;18.
61. van der Avoort CMT, van Loon LJC, Hopman MTE, Verdijk LB. Increasing vegetable intake to obtain the health promoting and ergogenic effects of dietary nitrate. *European Journal of Clinical Nutrition*. 2018.
62. Jonvik KL, Nyakayiru J, van Dijk JW, Wardenaar FC, van Loon LJC, Verdijk LB. Habitual dietary nitrate intake in highly trained athletes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*. Human Kinetics Publishers Inc.; 2017;27:148–57.
63. Majid Ezzati, Alan D. Lopez AR and CJLM. Comparative Quantification of Health Risks Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors. Who. 2004;1200.
64. WHO and FAO. Diet, Nutrition, and the Prevention of Chronic Diseases (Report of a joint WHO and FAO Expert Consultation). WHO Technical Report Series [Internet]. 2003;916:1–160. Available from: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/42665/WHO_TRS_916.pdf?sequence=1
65. Kalayc Z, Erim FB. Nitrate and Nitrites in Foods : Worldwide Regional Distribution in View of Their Risks and Benefits. 2019;
66. Hord NG, Tang Y, Bryan NS. Food sources of nitrates and nitrites: The physiologic context for potential health benefits. *American Journal of Clinical Nutrition*. 2009;90:1–10.

ANEXO I – Preparaciones culinarias y su contenido en NO₃-**Ensalada de calabaza asada y rúcula**

<u>Ingredientes</u>		<u>Preparación</u>
Calabaza	150g	1) Precalentar el horno a 180°C y preparar una bandeja. 2) Pelar y cortar en cubos la calabaza. 3) Mezclar con el aceite de oliva, el vinagre de Módena y la pimienta negra molida. 4) Disponer en una bandeja y hornear 25-30min, hasta que esté tierna. Dejar enfriar. 5) Lavar y escurrir la rúcula. Disponer en un plato. 6) Añadir la calabaza enfriada, las pipas y las semillas. 7) Mezclar el tomillo fresco, la pimienta negra molida, el zumo de limón y la salsa de soja. Añadir el aliño al plato. Servir.
Aceite de oliva virgen extra	10ml	
Vinagre de Módena	5ml	
Rúcula	30g	
Salsa de soja	5ml	
Zumo de limón	5ml	
Tomillo fresco	Al gusto	
Pimienta negra molida	Al gusto	
Pipas de calabaza	Al gusto	
Semillas de sésamo	Al gusto	

Notas

Esta receta aporta:

- 150g de fruta y 30g de verdura.
- 212.01mg de NO₃-.

Ensalada de hortalizas con rúcula y canónigos

<u>Ingredientes</u>		<u>Preparación</u>	
Rábano	40g	1)	Lavar todos los ingredientes.
Cebolla	15g	2)	Cortar el rábano y el pepino en rodajas finas.
Remolacha cocida/cruda	40g	3)	Cortar la zanahoria en tiras finas.
Zanahoria	15g	4)	Picar la cebolla.
Pepino	20g	5)	Cortar la remolacha en cubitos.
Rúcula	15g	6)	Disponer en un plato la rúcula y los canónigos.
Canónigos	15g	7)	Añadir las hortalizas.
Frambuesa	50g	8)	Aliñar con aceite de oliva, zumo de limón y vinagre de manzana.
Aceite de oliva	10ml	9)	Salpimentar al gusto.
Zumo de limón	5ml		
Sal	Al gusto		
Pimienta negra molida	Al gusto		
Vinagre de manzana	Al gusto		

Notas

Esta receta aporta:

- 50g de fruta y 145g de verdura.
- 214.19mg de NO₃.

La biodisponibilidad del NO₃ es mayor en la remolacha cocida que en la cruda.

Revuelto de espinacas y cebolla

Ingredientes

Espinaca fresca	120g
Cebolla	20g
Huevos	2 u.
Ajo	1 diente
Aceite de oliva	8ml
Sal	Al gusto

Preparación

- 1) Lavar las espinacas y cortar en tiras.
- 2) Picar el diente de ajo y la cebolla.
- 3) Calentar el aceite en una sartén. Sofreír el ajo y la cebolla. Cuando estén dorados, añadir la espinaca y cocinar durante 5-6 minutos.
- 4) Batir los huevos con un poco de sal.
- 5) Añadir los huevos batidos a la sartén y cocinar al gusto.
- 6) Servir.

Notas

Esta receta aporta:

- 140g de verdura.
- 260.64mg de NO₃-.

La biodisponibilidad del NO₃- es del 100% en la espinaca cocida.

Batido de espinaca, pepino, apio y manzana verde

Ingredientes

Espinaca fresca	100g
Pepino	50g
Apio	50g
Manzana verde	150g
Jengibre seco en polvo (opcional)	Al gusto
Agua	50ml

Preparación

- 1) Lavar bien todos los ingredientes.
- 2) Quitar el corazón a la manzana y cortar en trozos grandes todos los ingredientes
- 3) Colocar todos los ingredientes dentro de una batidora y añadir el agua y el jengibre.
- 4) Batir hasta que la mezcla se vea espesa y sin grumos.
- 5) Servir frío.

Notas

Esta receta aporta:

- 150g de fruta y 200g de verdura.
- 280.85mg de NO₃..

Hummus de remolacha con crudités

Ingredientes

Remolacha	120g
Tahini	1 cucharada
Zumo de limón	10ml
Aceite de oliva	10ml
Comino en polvo	½ c.p.
Paprika	½ c.p
Sal	Al gusto
Endibias	50g
Zanahoria	40g
Pepino	40g

Preparación

- 1) Cocinar la remolacha hasta que quede blandita.
- 2) Agregar la remolacha cocida, el tahini, el zumo de limón, el aceite y las especias en un procesador. Batir hasta que la mezcla sea homogénea y sin grumos.
- 3) Lavar las hortalizas. Pelar y cortar en tiras la zanahoria y el pepino.
- 4) Servir.

Notas

Esta receta aporta:

- 250g g de verdura.
- 266.81mg de NO₃.

La biodisponibilidad del NO₃ presente en la remolacha cocida es del 100%.

Rollos de col china rellenos al vapor

Ingredientes

Col china	80g
Carne picada (ternera magra)	125g
Zanahoria	50g
Cebolleta	25g
Ajo	1 diente
Jengibre seco en polvo	Al gusto
Aceite de oliva virgen extra	10ml
Salsa de soja	10ml
Sal	Al gusto
Pimienta negra	Al gusto

Preparación

- 1) Picar el ajo. Pelar la cebolleta y la zanahoria y cortar en juliana.
- 2) Calentar aceite de oliva en una sartén y echar el ajo. Saltear.
- 3) Cuando empiece a dorarse añadir la carne picada y el jengibre en polvo y rehogar hasta que la carne esté prácticamente hecha.
- 4) Añadir la zanahoria, la cebolla y la salsa de soja y cocinar un par de minutos más.
- 5) Salpimentar y retirar del fuego.
- 6) Rellenar las hojas de col china con la mezcla de carne. Hacer un rollito.
- 7) Cocer al vapor unos minutos.
- 8) Servir.

Notas

Esta receta aporta:

- 160g de verdura.
- 131.88mg de NO₃-.

Utilizar alimentos ricos en polifenoles y Vitamina C y E, como es el caso del limón y otras frutas ácidas, vinagre de manzana, entre otros, favorece la conversión gástrica de NO₂- a NO.